

УДК 621.923.7

## РАСЧЕТ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

Л.М.КОЖУРО, д.т.н., профессор (БАТУ); С.С.МАКАРЕВИЧ, к.т.н., доцент (БГТИ);  
А.П.РАКОМСИН, инженер (ГП "МАЗ")

Остаточные напряжения являются одной из причин разрушения покрытий. Однако необходимо отметить, что из-за многообразия факторов, влияющих на возникновение остаточных напряжений, и сложности их математического описания, многие аспекты прогнозирования и регулирования значений и знака напряжений являются открытыми.

Для оценки свойств покрытий используют такие понятия, как модуль упругости, коэффициенты линейного расширения, Пуассона, теплопроводности и т.д., усредненные по объему значительно больше, чем объем отдельно взятой капли. Поэтому кристаллизацию отдельно взятых капель при электромагнитной наплавке [1] можно заменить модельным непрерывным процессом и проводить расчеты на основании существующих теорий физики и механики сплошной среды.

При рассмотрении наплавленного покрытия как сплошной среды, в первую очередь, представляют интерес остаточные напряжения первого рода, уравнивающиеся в объеме, соизмеримом с размерами всего изделия. В этом случае замена кристаллизации отдельно взятых капель модельным непрерывным процессом является оправданной [2]. Впервые такое модельное рассмотрение в рамках теории упругости было введено в работе [3], затем оно получило дальнейшее подтверждение в работе [4]. При этом многие определяют температурную составляющую остаточных напряжений, рассматривая окончательно сформировавшееся покрытие. В действительности же остаточные напряжения формируются при постепенном приложении нагрузки и температуры до некоторых окончательных значений.

При определении остаточных напряжений в покрытиях, полученных электромагнитной наплавкой, приняли, как и авторы работы [5], следующую модель процесса: длина образца достаточно велика по сравнению с его диаметром и в нем в процессе наплавки возникает подвижное квазистационарное температурное поле; остаточные напряжения возникают в результате наплавки и охлаждения образца до температуры окружающей среды.

Наплавленное покрытие рассматривали как сплошную среду (пористость покрытий не более 5%), что позволяло рассматривать задачу в рамках феноменологических теорий теплообмена и механики сплошной среды.

Ввиду того, что процесс наплавки заготовки занимает малое время, будем считать, что температурное поле является постоянным в направлении оси

цилиндра  $Z$  и симметричным относительно ее. Оно изменяется только по радиусу  $r$ , т.е.  $T = T(r)$ , и остается постоянным в окружном направлении  $\theta$ .

Напряжения, возникающие при этом, можно определять как для осесимметричной задачи теории упругости в цилиндрических координатах [6].

Так как после наплавки цилиндрическая деталь получается двухслойной, будем обозначать слои порядковыми номерами 1 и 2, начиная от центра. При этом внутренний радиус первого слоя обозначим  $r_1$ , радиус границы слоев обозначим  $r_2$ , а внешний радиус второго слоя -  $r_3$ .

При описанном выше модельном процессе площадки, проведенные в детали перпендикулярно к осям  $Z$ ,  $r$  и  $\theta$ , будут главными площадками и на них будут возникать только нормальные напряжения

$\sigma_{iz}, \sigma_{ir}, \sigma_{i\theta}$ . Обозначим  $w_i$  перемещение в направлении оси  $Z$ , а  $u_i$  - в направлении радиуса  $r$ , где  $i$  - порядковый номер слоя.

Условия равновесия в этом случае будут сведены к уравнениям

$$r \frac{\partial \sigma_{ir}}{\partial r} + \sigma_{ir} - \sigma_{i\theta} = 0; \quad \sum_{i=1}^r \int_{r_i}^{r_{i+1}} \sigma_{iz} r dr = 0. \quad (1)$$

Кинематические уравнения для  $i$ -го слоя можно представить в виде

$$\varepsilon_{iz} = \frac{\partial w_i}{\partial z}; \quad \varepsilon_{ir} = \frac{\partial u_i}{\partial r}; \quad \varepsilon_{i\theta} = \frac{u_i}{r}. \quad (2)$$

Физические уравнения с учетом температуры для  $i$ -го слоя запишутся следующим образом

$$\begin{aligned} \sigma_{iz} &= 2G_i \varepsilon_{iz} + \lambda_i l_i - \eta_i T_i; \\ \sigma_{ir} &= 2G_i \varepsilon_{ir} + \lambda_i l_i - \eta_i T_i; \\ \sigma_{i\theta} &= 2G_i \varepsilon_{i\theta} + \lambda_i l_i - \eta_i T_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $l_i$  - относительная объемная деформация

$$(l_i = \varepsilon_{iz} + \varepsilon_{ir} + \varepsilon_{i\theta});$$

$\eta_i = E_i \alpha_i / (1 - 2\mu_i)$  - постоянная для данного слоя величина;  $G_i = 0,5 E_i / (1 + \mu_i)$  - модуль сдвига;  $\lambda_i = 2 \mu_i G_i / (1 - 2\mu_i)$  - постоянная Ляме;  $E_i$  - модуль Юнга;  $\mu_i$  - коэффициент Пуассона;  $\alpha_i$  - коэффициент линейного расширения.

Решая совместно уравнения (1) - (3), получим дифференциальное уравнение для  $i$ -го слоя

$$\frac{d}{dr} \left( \frac{1}{r} \frac{d(u_i r)}{dr} + \frac{1+\mu_i}{1-\mu_i} \alpha_i T_i \right) = 0. \quad (4)$$

Проинтегрировав уравнение (4) дважды, найдем

$$u_i = C_i r + \frac{D_i}{r} + \frac{1+\mu_i}{1-\mu_i} \frac{\alpha_i}{r} \int_{r_i}^r T_i(r) dr, \quad (5)$$

где  $C_i, D_i$  - постоянные интегрирования.

Зная радиальное перемещение  $u_i$  и, используя уравнения (1) - (3), определим напряжения в слоях

$$\sigma_{ir} = \frac{E_i}{1-\mu_i^2} \left[ C_i(1+\mu_i) - \frac{D_i}{r^2}(1-\mu_i) - (1+\mu_i) \frac{\alpha_i}{r^2} \int_{r_i}^r r T_i(r) dr \right];$$

$$\sigma_{i\theta} = \frac{E_i}{1-\mu_i^2} \left[ C_i(1+\mu_i) + \frac{D_i}{r^2}(1-\mu_i) - (1+\mu_i) \alpha_i \left( T_i(r) - \frac{1}{r^2} \int_{r_i}^r r T_i(r) dr \right) \right];$$

$$\sigma_{iz} = \frac{E_i}{(1+\mu_i)(1-2\mu_i)} \left[ (1-\mu_i) \varepsilon_z + 2\mu_i C_i \right] - \frac{E_i \alpha_i}{1-\mu_i} T_i(r). \quad (6)$$

Относительная деформация  $\varepsilon_z$ , входящая в формулу для  $\sigma_{iz}$ , определится из условия совместности деформаций слоев  $\varepsilon_{iz} = \varepsilon_{2z} = \varepsilon_z$  и из второго уравнения равновесия системы (1)

$$\varepsilon_z = \sum_{i=1}^m \left( \frac{E_i \alpha_i}{1-\mu_i} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr + \frac{E_i \mu_i (r_i^2 - r_{i+1}^2)}{(1+\mu_i)(1-2\mu_i)} C_i \right) / \sum_{i=1}^m B_i, \quad (7)$$

$$\text{где } B_i = \frac{E_i (1-\mu_i)(r_{i+1}^2 - r_i^2)}{2(1+\mu_i)(1-2\mu_i)};$$

$m=2$  - число слоев.

Когда температура наплавляемого слоя падает до некоторой величины  $T_2$ , между наплавляемым слоем и основной деталью возникает адгезионная связь. При дальнейшем остывании, ввиду различного значения коэффициентов линейного расширения, между наплавляемым слоем и основной деталью на границе возникает контактное давление  $P$ .

Давление  $P$  и постоянные интегрирования  $C_i, D_i$  определяются из граничных условий: при  $r = r_1$   $\sigma_{1r} = 0$ ; при  $r = r_2$ ;  $\sigma_{1r} = -P$ ,  $\sigma_{2r} = -P$ ,  $u_1 = u_2$ ; при  $r = r_3$

$$\sigma_{2r} = 0.$$

Используя эти условия, из уравнений (5) и (6) получим

$$P = \sum_{i=1}^m \left[ (-1)^{i-1} \frac{2\alpha_i}{(1-\mu_i)(r_{i+1}^2 - r_i^2)} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr \right] / \sum_{i=1}^m \left[ \frac{(1-\mu_i)r_{i+1}^2 + (1+\mu_i)r_i^2}{E_i(r_{i+1}^2 - r_i^2)} \right];$$

$$C_i = \frac{1-\mu_i}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \left[ \frac{\alpha_i}{1-\mu_i} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr + (-1)^{i-1} \frac{r_{i+1}^2}{E_i} P \right];$$

$$D_i = \frac{(1+\mu_i)r_i^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \left[ \frac{\alpha_i}{1-\mu_i} \int_{r_i}^{r_{i+1}} r T_i(r) dr + (-1)^{i-1} \frac{r_{i+1}^2}{E_i} P \right]. \quad (8)$$

В процессе наплавки на заготовку попадает расплавленный материал при некоторой температуре  $T$ . Частицы расплавленного материала при соприкосновении с поверхностью заготовки очень быстро остывают и, как показано в работе [1], к моменту соединения наплавляемого материала с заготовкой температура его равна  $T_2$  ( $T_2 = 150 \dots 250$  °C). Следовательно, на внешней поверхности заготовки ( $r = r_2$ ) можно принять расчетную температуру  $T_2$ . С уменьшением радиуса  $r$  она будет резко падать, так как продолжительность наплавки небольшая и температура не успевает достичь больших значений на достаточной глубине. Проведенные нами опыты показали, что с достаточной точностью распределение температуры по радиусу можно записать зависимостью

$$T(r) = T_0 + (T_2 - T_0) \left( \frac{r}{r_2} \right)^n,$$

где  $T_0$  - температура в центре заготовки ( $r = 0$ ) в предположении, что она сплошная;  $n$  - положительное число.

Что касается наплавляемого слоя, то, учитывая его небольшую толщину, температуру можно считать постоянной по толщине и равной  $T_2$ .

В заготовке в момент наплавки будут возникать напряжения от неравномерного распределения температуры. Эти напряжения будем называть напряжениями наплавки и обозначать с индексом "н". Напряжения наплавки в заготовке  $\sigma_{1z}^n, \sigma_{1\theta}^n$  и  $\sigma_{1r}^n$  определяются по формулам (6) - (8) при  $m = 1$  и  $P = 0$ . Напряжения наплавки в наплавляемом слое отсутствуют  $\sigma_{2z}^n = \sigma_{2r}^n = \sigma_{2\theta}^n = 0$ .

В дальнейшем при остывании также будут возникать остаточные напряжения, которые будем обозначать с индексом "о". Для определения остаточных напряжений остывания в заготовке необходимо в формулах (6) - (8) принять

$$T_1(r) = - \left[ T_0 + (T_2 - T_0) \left( \frac{r}{r_2} \right)^n \right],$$

а для наплавляемого слоя  $T_2(r) = -T_2$ . В результате остаточные напряжения будут складываться из напряжений, возникающих в процессе наплавки, и напряжений, возникающих при остывании

$$\sigma_{ir} = \sigma_{ir}'' + \sigma_{ir}^0; \sigma_{i0} = \sigma_{i0}'' + \sigma_{i0}^0; \sigma_{iz} = \sigma_{iz}'' + \sigma_{iz}^0.$$

Таким образом, как в заготовке, так и в наплавленном слое остаточные напряжения будут создавать объемное напряженное состояние, которое необходимо учитывать при расчетах на прочность восстановленных электромагнитной наплавкой деталей.

Полученные расчетные соотношения позволили разработать алгоритм и составить программу для численных исследований остаточных напряжений при электромагнитной наплавке. Установлено, что для покрытий в зависимости от условий наплавки величина остаточных напряжений изменяется в пределах 200...650 МПа, в основе - от -4 до -20 МПа. Характер их распределения не изменяется: в покрытии формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе - сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса электромагнитной наплавки за счет повышения разрядного тока приводит к росту термопластических деформаций в системе покрытие - основа. Так, изменение разрядного тока от 100 до 160 А увеличивает остаточные напряжения в 2,2 раза. Наибольших величин остаточные напряжения достигают на границе раздела покрытия с основой.

Проведенные экспериментальные исследования остаточных напряжений в покрытии и основе, которые определялись рентгеноструктурным анализом, используя метод определения параметров линейно-напряженного состояния металла по смещению линий рентгенограммы, подтвердили достоверность численных результатов определения напряжений, так как расхождение не превышало 16%. Кроме того, экспериментально установлено, что при совмещении электромагнитной наплавки с поверхностным пластическим деформированием как в покрытии, так и в основе формируются остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине деформационного слоя покрытий. Шлифование покрытий и последующая магнитно-абразивная обработка увеличивают градиент остаточных напряжений сжатия, которые для покрытий из порошков Fe-10%V, P6M5Ф3 и С-300 соответственно составляют 730, 640 и 580 МПа.

*Работа выполнялась при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.*

#### Литература

1. Кожуро Л.М., Чемисов Б.П. Обработка деталей машин в магнитном поле. - Мн.: Навука і тэхніка, 1995. - 232 с.
2. Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. и др. Теория и практика газопламенного напыления. - Мн.: Навука і тэхніка, 1993. - 295с.
3. Вирник А.М., Морозов И.А., Подзей А.В. //Физика и химия обработки материалов. 1970, № 4. С.53...58.
4. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойствами плазменных покрытий. - М.: Машиностроение, 1990. - 384 с.
5. Ящерицын П.И., Кожуро Л.М., Хейфец М.Л., Чемисов Б.П. //Докл. НАН Беларуси. 1997. Т.41, № 3. С.112...118.
6. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. - М.: Высшая школа, 1968. - 512 с.

**С.И. Альфтек Индустриес**

*Предлагает  
со склада в г. Минске.*

- ☒ Абразивный инструмент
- ☒ Алмазный инструмент
- ☒ Металлорежущий инструмент
- ☒ Подшипники заводов СНГ
- ☒ Профессиональные щетки из стальной проволоки

Платежные реквизиты:

**Расчетный счет**

3012004380015

в Партизанском отд.  
БелПСБ г.Минска

**Код**

386

**УНН**

100019233

**Возможна оплата по  
чековой книжке**

При получении знать коды  
УНН и ОКПО

**Наш адрес и телефоны:**

**Отдел инструмента**

(017) 265-13-90,

268-73-36, 268-28-53

**Отдел подшипников**

(017) 265-28-53

**Факс**

(017) 265-14-82

**Адрес**

220103 г.Минск, ул.Кнорина, 55

Склад работает с 8.00 до 16.00 (кроме субботы и воскресенья)